



Fachverband für Strahlenschutz e. V.

Mitgliedsgesellschaft der
International Radiation
Protection Association
(IRPA)

für Deutschland
und die Schweiz

Publikationsreihe
FORTSCHRITTE
IM STRAHLENSCHUTZ

Publication Series
PROGRESS IN RADIATION

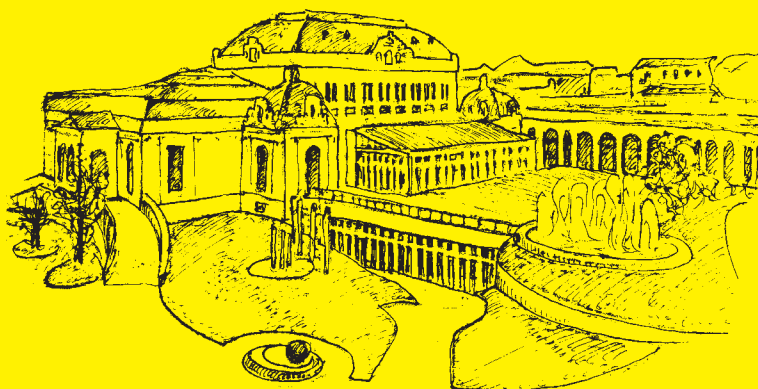
STRAHLEN | SCHUTZ | GESUNDHEIT

**8. Gemeinsame Tagung des
Österreichischen Verbandes für Strahlenschutz ÖVS
und des Fachverbandes für Strahlenschutz e. V.
für Deutschland und die Schweiz
unter Mitwirkung von:**

**Österreichische Gesellschaft für
Medizinische Physik ÖGMP,
Verband für Medizinischen Strahlenschutz
in Österreich VMSÖ**

47. Jahrestagung des FS

**5. bis 9. Oktober 2015
Baden bei Wien**



Bandherausgeber:
Michael Hajek
Franz Josef Maringer
Martina Schwaiger
Andreas Steurer
Günter Timal

STRAHLENSCHUTZ IM WELTRAUM UND AUF REISEFLUGHÖHEN – ERKENNTNISSE UND “SPIN OFFS” FÜR ANWENDUNGEN AUF DER ERDE

RADIATION PROTECTION IN SPACE AND AT AVIATION ALTITUDES – LESSONS LEARNED AND EARTH SPIN-OFFS

T. Berger¹⁾

¹⁾Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR),
Köln, Deutschland

thomas.berger@dlr.de

Zusammenfassung

Seit den Frühzeiten der bemannten Raumfahrt ist klar, dass die Strahlung im Weltraum einen limitierenden Faktor für Langzeitmissionen des Menschen im All darstellt. Das Strahlungsfeld im erdnahen Orbit unterscheidet sich in seiner Zusammensetzung und seinen Energien signifikant von der natürlichen Strahlungsumgebung die wir auf der Erde vorfinden. Zusätzlich können sporadisch solare Teilchenereignisse, deren Auftretenswahrscheinlichkeit mit der Sonnenaktivität korreliert ist, die Strahlungsdosis in kurzer Zeit extrem erhöhen. All dies führt zu Strahlungsdosen die ein Vielfaches der Dosiswerte des beruflich strahlenexponierten Personals auf der Erde erreichen. Die Anforderungen an die Strahlungsdetektoren im Weltraum unterscheiden sich aufgrund des komplexen Strahlungsfeldes sehr von erdnahe Dosimetrie und beinhalten zusätzlich Beschränkungen für Masse und Stromverbrauch. Bewegen wir uns von der Raumstation auf Reiseflughöhen so entsteht durch die Wechselwirkung der primären kosmischen Strahlung mit der Atmosphäre ein komplexes Sekundärfeld, welches sich insbesondere durch einen hohen Neutronenanteil auszeichnet. Für diese Anwendungen wurden und werden unterschiedlichste Detektorsysteme entwickelt und laufend verbessert um die relevanten strahlenschutztechnischen Größen wie die Energiedosis und die Effektive Dosis bestimmen zu können. Vor allem zur Bestimmung der Effektiven Dosis werden im Weltraum Phantome verwendet. All diese Untersuchungen, die gewonnenen Erkenntnisse und Daten finden Anwendung im Rahmen der Grundlagenforschung zur Schwerionentherapie; so werden zum Beispiel Phantome und Detektoren aus der Weltraumanwendung zur Untersuchungen der Sekundärdosis bei Anwendungen der Schwerionenstrahlentherapie verwendet.

Summary

Since the early times of human spaceflight radiation has been recognized as a main health concern for long duration human space missions. The natural radiation environment at International Space Station (ISS) orbits differs significantly in composition and energy from that found on Earth. It consists of contributions from Galactic Cosmic Rays (GCR), as well as protons and electrons trapped in the Earth's radiation belts. Occasional Solar Particle Events (SPEs) might in addition contribute to the radiation exposure, the occurrence probability of which is increased during solar maximum conditions. The exposure the crew receives during a spaceflight significantly exceeds exposures routinely received by terrestrial radiation workers. The requirements for radiation detectors in space are very different from those on Earth. Limitations in mass, power consumption and the complex nature of the space radiation

environment define and limit the overall construction of radiation detectors. The interactions of the primary cosmic radiation with the constituents of the Earth's atmosphere produce the radiation field at aviation altitudes with a high neutron contribution. For both space and aircraft applications various detector systems have been and are developed to determine the relevant radiation protection quantities from absorbed dose up to effective dose, applying phantoms specifically developed for this application. All these investigations, knowledge gained and data received is also utilized for the design and investigations of ground based research in the field of heavy ion therapy, as for example applying space based phantoms for dose determination investigations during heavy particle cancer treatment.

Schlüsselwörter: Internationale Raumstation, Effektive Dosis, Strahlenschutz, Krebstherapie
Keywords: International Space Station, Effective Dose, Radiation Protection, Cancer therapy

1. Einleitung

Die Menschheit ist dem Ziel der weiteren Erforschung des Sonnensystems und unserer nächsten Nachbarn – und insbesondere des Mars – im August des Jahres 2012 einen bedeutenden Schritt näher gekommen. In nun über 3 Jahren seit seiner Landung erforscht der Curiosity Rover des Mars Science Laboratories (MSL) die Oberfläche des roten Planeten (<http://mars.nasa.gov/msl>). Mit an Bord ist auch der Radiation Assessment Detector (RAD) mit welchem es erstmals gelang während des Fluges zum Mars [1] und auf dessen Oberfläche [2] Messungen der Strahlungsumgebung durchzuführen. Des Weiteren ist seit dem Abschluss des Ausbaus der Internationalen Raumstation (ISS) im Jahre 2012, trotz aller Schwierigkeiten mit den Versorgungsflügen der letzten Monate, die Station darauf ausgelegt eine Besatzung von sechs Astronauten versorgen zu können. Dies erlaubt die Durchführung einer hohen Zahl an Experimenten, bedeutet aber auch, dass nun mehr Astronauten auf längere Zeit der Strahlungsumgebung auf der ISS ausgesetzt sind [3]. Die Bestimmung des Strahlenrisikos der Astronauten setzt die genaue Kenntnis der Zusammensetzung des Strahlungsfeldes und der damit verbundenen Organdosen im Körper voraus. Das Strahlungsfeld im erdnahen Orbit ist mit keinem Strahlungsfeld auf der Erde, sei es natürlichen oder künstlichen Ursprungs, vergleichbar. Es besteht zu einem Teil aus der galaktisch kosmischen Strahlung, Anteilen von Protonen und Elektronen aus den Strahlungsgürteln der Erde und einem gelegentlichen Beitrag aus hochenergetischen Protonen welche hin und wieder von der Sonne während eines solaren Teilchenereignisses emittiert werden. Der 11-jährige Sonnenzyklus hat dabei einen wesentlichen Einfluss auf diese Komponenten [3]. Durch die Wechselwirkung dieses Strahlungsfeldes mit der Hülle der ISS wird ein Sekundärstrahlungsfeld erzeugt, welches unter anderem auch einen großen Anteil von hochenergetischen, biologisch wirksamen Neutronen enthält. Die meisten der primären Teilchen können aufgrund ihrer hohen Energie leicht die Hülle der ISS durchdringen und somit – während eines solaren Minimums – Dosen von bis zu 1 mSv/d applizieren [5]. Im Vergleich dazu liegt die durchschnittliche jährliche Exposition durch natürliche Strahlenquellen auf der Erde bei 2,4 mSv/a, d. h. ungefähr einen Faktor 1/150 niedriger. Der Anteil der kosmischen Strahlung beträgt dabei 0,3 mSv/a [6].

2. Die Effective Dosis im Weltraum

In ihrem Orbit ist die ISS durch das Erdmagnetfeld so gut abgeschirmt, dass die Wahrscheinlichkeit für akute Effekte durch ein solares Teilchenereignis eher gering ist, wobei die Astronauten sehr wohl beim Auftreten eines solchen Ereignisses in besser abgeschirmten Bereichen der Raumstation Schutz suchen. Somit beschäftigt sich der Strahlenschutz an Bord der Raumstation hauptsächlich mit den Langzeiteffekten – sprich genetischen Effekten und der

möglichen Krebsinduktion. Zur Abschätzung des Krebsrisikos wurde im ICRP Report 60 [7] die Effektive Dosis E eingeführt, welche im ICRP Report 103 nochmals bestätigt wurde [8]. Zur Bestimmung von E ist zu allererst die Bestimmung des Organdosisäquivalents H_T notwendig, definiert als die Organdosis D_T multipliziert mit dem Strahlenwichtungsfaktor w_R . Die Summation über alle Organe, T , gewichtet mit dem Gewebewichtungsfaktor w_T führt dann zur Effektiven Dosis E . Aus messtechnischer Sicht muss angemerkt werden, dass E eine risikorelevante, messtechnisch aber nicht bestimmbare Größe ist. Weiterhin bezieht sich die Definition des w_R auf die Qualität und die Art des “externen Strahlenfeldes”, definiert einen w_R von 20 für alle hochenergetischen Ionen und inkludiert in keiner Weise die Wechselwirkungen des einfallenden Strahlenfeldes mit dem Körper. Aufgrund dieser Definition setzt die Bestimmung von E bzw. der w_R die Messung aller relevanten Strahlungsfeldparameter des eintreffenden Feldes voraus, was schon alleine vom messtechnischen Standpunkt aus im Weltraum unmöglich ist. Im Gegensatz zur Definition des Organdosisäquivalents H_T ist die Äquivalentdosis in einem Organ (siehe Gl. 1), wie im NCRP Report 132 [10] definiert und im NCRP Report 142 [11] als Dosisgröße und Ersatz des Organdosisäquivalents festgelegt, eine messbare Größe. Die Äquivalentdosis in einem Organ (siehe Gl. 1) bestimmt sich über die Summation der absorbierten Dosis durch Teilchen mit linearem Energietransfer L_i in diesem Organ $\Delta D_T(L_i)$ multipliziert mit dem in Abhängigkeit des linearen Energietransfers L definierten Qualitätsfaktors $Q(L)$, und folgt somit der Definition der Äquivalentdosis in ICRP 60 [7].

$$\bar{H}_T = \int_L D_T(L)Q(L)dL \approx \sum_{L_i} \Delta D_T(L_i)Q(L_i) \quad (1)$$

Die Effektive Äquivalentdosis (*effective dose equivalent*) H_E setzt sich nun aus der Summation über alle Organe multipliziert mit w_T zusammen, und dient für die Messungen im Weltraum als Approximation der durch ICRP 103 definierten effektiven Dosis E (siehe Gl. 2) und wurde auch so in ICRP 123 für die Anwendung im Weltraum bestätigt [9].

$$E = \sum_T w_T H_T \approx \sum_T w_T \bar{H}_T \equiv H_E \quad (2)$$

3. Das MATROSHKA Experiment

Die Messung von Organdosen auf der ISS zur Bestimmung des Strahlenrisikos kann nur unter Verwendung von gewebeäquivalenten Phantomen durchgeführt werden. Um die genaue Bestimmung der Dosen in den jeweiligen Organen zu gewährleisten, ist es notwendig, die Tiefendosisverteilung im Phantom bzw. auch die Dosis auf der Haut des Phantoms zu ermitteln. Die Hautmessung würde hierbei der Personendosimetrie entsprechen, wie sie für alle Astronauten mit Personendosimetern durchgeführt wird [12]. Das größte internationale Forschungsvorhaben zur Bestimmung der Effektiven Dosis bzw. der Effektiven Äquivalentdosis war das MATROSHKA-Experiment [13]. Im Rahmen von MATROSHKA wurde erstmals ein anthropomorphes Phantom an der Außenseite der Raumstation exponiert (MTR-1) [14] um somit einen Astronauten, der einen Weltraumspaziergang unternimmt, zu simulieren und dessen Exposition zu bestimmen. Weitere Innenexpositionen im russischen (MTR-2A und MTR-2B) [15] und im japanischen Teil (MTR-2 KIBO) der Raumstation komplettierten den gewonnenen Datensatz. Die einzelnen Expositionsphasen des Phantoms sind in Abb. 1 dargestellt, welches das Phantom, bestückt mit über 6000 passiven Strahlungsdetektoren im Rahmen von MTR-1 (außerhalb) und von MTR-2A und -2B (innerhalb der ISS Raumstation) zeigt.

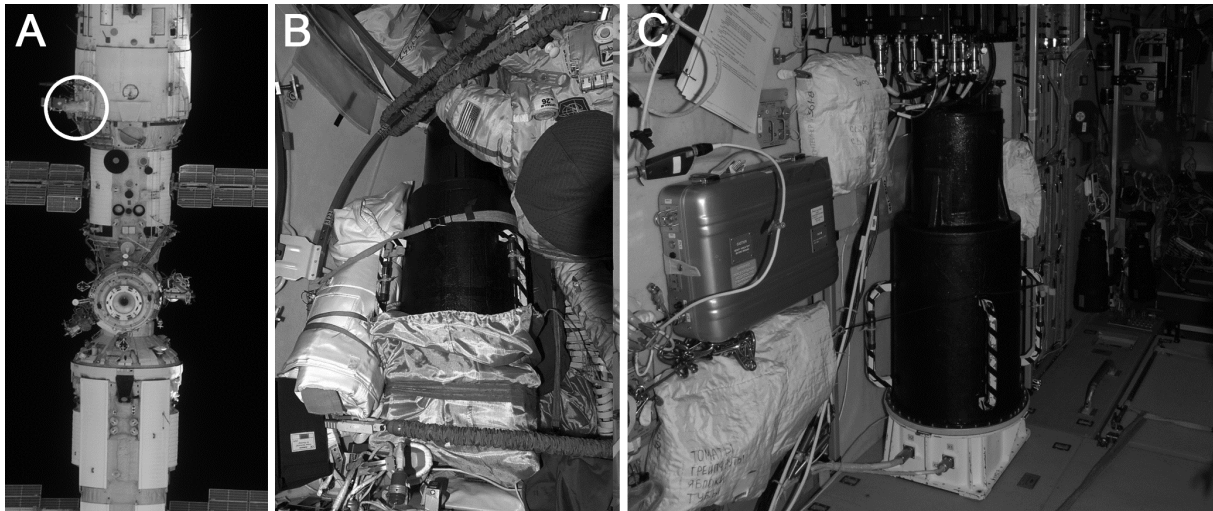


Abb. 1: Das MATROSHKA Experiment an Bord der Internationalen Raumstation (A) außerhalb des Zvezda Moduls, (B) Innerhalb des Pirs Moduls und (C) innerhalb des Zvezda Moduls. Das anthropomorphe Phantom ist von einem schwarzen Kohlefasercontainer umgeben.

Die Kombination von Messdaten der passiven Strahlungsdetektoren innerhalb und außerhalb des Phantoms ermöglichten die Organdosen und andererseits, unter der Anwendung von G1.2 die Effektive Äquivalentdosis zu bestimmen [16].

Die Ergebnisse der Messungen außerhalb (MTR-1) und an zwei Orten innerhalb der Raumstation sind in Tab. 1 dargestellt.

Tab. 1: Im Rahmen des MATROSHKA Projektes gemessene Effektive Äquivalentdosis

Experiment	Zeitraum	Ort auf der ISS	H_E [mSv/Tag]
MTR-1	2004 - 05	Zvezda Modul (Außerhalb)	690 ± 33
MTR-2A	2006	Pirs Modul	549 ± 27
MTR-2B	2007 - 09	Zvezda Modul	566 ± 29

Die gemessene Effektive Äquivalentdosis für einen Außenbordeinsatz beträgt 690 ± 33 $\mu\text{Sv/Tag}$ im Vergleich zu 549 ± 27 $\mu\text{Sv/Tag}$ für einen Aufenthalt innerhalb der Raumstation.

4. Earth Spin off

Aber nicht nur auf der Raumstation finden Phantome ihren Einsatz. Im Rahmen einer Kooperation mit der GSI, Darmstadt, Deutschland wurde einer der Zwillinge des MATROSHKA Phantoms mit Detektoren versehen und als Patient verwendet. Ziel dieser Untersuchungen war es, die auftretende Dosis der Sekundärstrahlung während der Therapie eines hypothetischen, im Zentrum des Kopfes gelegenen Tumors für unterschiedliche Therapieszenarien zu bestimmen. Hierbei wurden vor jeder Bestrahlung CT-Aufnahmen für die Bestrahlungsplanung erstellt und die Bestrahlung dann als Patientenbestrahlung mit IMRT (KGU, Frankfurt, Deutschland) Protonen (Passive Modulation am TSL, Upsalla, Schweden; Spot Scanning am PSI, Villigen, Schweiz) und Kohlenstoff Ionen (Raster Scanning an der GSI, Darmstadt, Deutschland; Passive Modulation am NIRS-HIMAC, Chiba, Japan) durchgeführt.

Abb.2 zeigt das Setup für den CT-Scan und die IMRT Bestrahlung in Frankfurt (links) und für die Bestrahlung mit Kohlenstoff Ionen am NIRS (rechts).

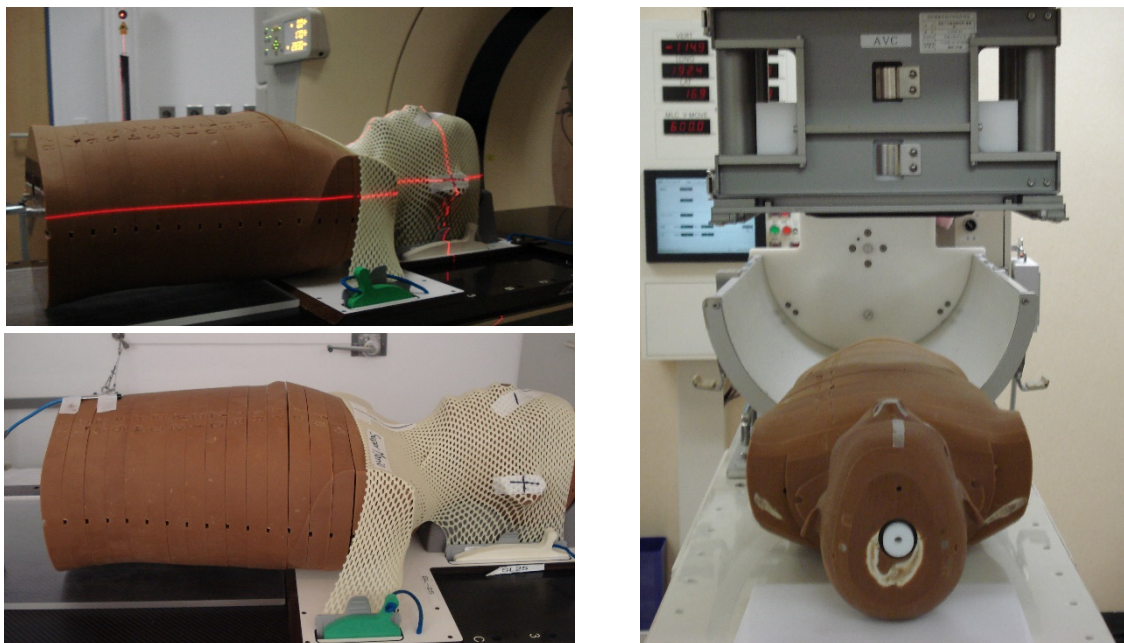


Abb. 2: Phantom (CT-Scan) (links oben) und Bestrahlung (IMRT) am KGU, Frankfurt (links unten), Bestrahlung mit Kohlenstoff Ionen am NIRS-HIMAC, Chiba, Japan (rechts)

Es konnte unter anderem gezeigt werden, dass es eindeutige Unterschiede in Bezug auf die Sekundärdosis in Abhängigkeit der Bestrahlungsarten (passive oder aktive Modulation) gibt, und dass im direkten Vergleich bei gleicher Teilchenart „Raster Scanning“ bzw. „Spot Scanning“ Systeme den passiven Modulationen hinsichtlich der Minimierung von Sekundäreexpositionen überlegen sind [17], [18].

5. Danksagung

Ich danke allen Astro- und Kosmonauten, die an der Ausführung des MATROSHKA Projekts beteiligt waren. Die Datenauswertung des MATROSHKA Experiments wurde im Rahmen des FP7 Projekts HAMLET (<http://www.fp7-hamlet.eu>) von der EU gefördert. Dank gilt auch allen Kollegen, die die weltweiten Bestrahlungen des MATROSHKA Zwillings ermöglichten.

6. Literaturverzeichnis

- [1] C. Zeitlin, D. Hassler, F.A. Cucinotta, B. Ehresmann, R.F. Wimmer-Schweingruber, et al, Measurements of Energetic Particle Radiation in Transit to Mars on the Mars Science Laboratory, Science, 340(6136), p. 1080-1084, 2013
- [2] D. Hassler, C. Zeitlin, R.F. Wimmer-Schweingruber, B. Ehresmann, S. Rafkin, et al, Mars' Surface Radiation Environment Measured with the Mars Science Laboratory's Curiosity Rover, Science, 343(6169), 2013
- [3] R. B. Setlow, The hazards of space travel, EMBO Rep. 4, p. 1013-1016, 2003
- [4] G. Reitz, Characteristic of the Radiation Field in Low Earth Orbit and in Deep Space, Zeitschrift für Medizinische Physik, 18 (4), p. 233-243, 2008

- [5] M. Durante, F. Cucinotta, Physical basis of radiation protection in space travel, Review of Modern Physics, 83(4), p. 1245, 2011
- [6] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, UNSCEAR, Vienna, 2000
- [7] ICRP, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21 (1-3), 1991
- [8] ICRP, The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4), 2007
- [9] ICRP, Assessment of Radiation Exposure of Astronauts in Space. ICRP Publication 123. Ann. ICRP 42(4), 2013
- [10] NCRP. Radiation protection guidance for activities in low earth orbit. Report Nr. 132, Bethesda, MD, 2000
- [11] NCRP. Operational Radiation Safety Program for Astronauts in Low Earth Orbit: A Basic Framework. Report Nr. 142, Bethesda, MD, 200
- [12] U. Straube, T. Berger, G. Reitz, R. Facius, C. Fuglesang, T. Reiter, V. Damann, M. Tognini, Operational radiation protection for astronauts and cosmonauts and correlated activities of ESA Medical Operations, Acta Astronautica, 66, p. 963 – 973, 2010
- [13] G. Reitz, T. Berger, P. Sundblad, J. Dettmann, REDUCING RADIATION RISK IN SPACE The Matroshka project, ESA Bulletin, 141, p. 28-36, 2010
- [14] G. Reitz, T. Berger, P. Bilski, R. Facius, M. Hajek et al., Astronaut's Organ Doses Inferred from Measurements in a Human Phantom Outside the International Space Station, Radiation Research, 171(2), p. 225-235, 2009
- [15] T. Berger, P. Bilski, M. Hajek, M. Puchalska, G. Reitz, The MATROSHKA Experiment: Results and Comparison from EVA (MTR-1) and IVA (MTR-2A/2B) Exposure, Radiation Research, 180(6), p. 622–637, 2013
- [16] M. Puchalska, P. Bilski, T. Berger, M. Hajek, T. Horwacik, C. Körner, P. Olko, V. Shurshakov, G. Reitz, G. NUNDO - a numerical model of a human torso phantom and its application to effective dose calculations for astronauts at the ISS. Radiation Environmental Biophysics, 53(4), p. 719-727, 2014
- [17] C. La Tessa, T. Berger, R. Kaderka, D. Schardt, C. Körner, U. Ramm, J. Licher, N. Matsufuji, C. Vallhagen Dahlgren, T. Lomax, G. Reitz, M. Durante, Out-of-field dose studies with an anthropomorphic phantom: comparison of X-rays and particle therapy treatments, Radiotherapy and Oncology, 105(1), p. 133-138, 2012
- [18] C. La Tessa, T. Berger, R. Kaderka, D. Schardt, S. Burmeister, J. Labrenz, G. Reitz, M. Durante, Characterization of the secondary neutrons field produced during treatment of an anthropomorphic phantom with X-rays, protons and carbon ions, Physics in Medicine and Biology, 59, p. 2111–2125, 2014